

Studies in Cyclone Development (低気圧発達の研究)

著者	竹内 衛夫
号	301
発行年	1970
URL	http://hdl.handle.net/10097/23586

氏名・（本籍）	たけ　　うち　　もり　　か 竹　　内　　衛　　夫
学　位　の　種　類	理　　学　　博　　士
学　位　記　番　号	理　第　3　0　1　号
学位授与年月日	昭和45年11月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最　終　学　歴	昭和25年3月 気象技術官養成所研究科卒業
学　位　論　文　題　目	Studies in Cyclone Development (低気圧発達の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 山　本　義　一　教授 上　山　　弘 教授 高　木　章　雄 助教授 大　西　外　史

論　文　目　次

第1部 地表面低気圧発達理論

- 1 序　　論
- 2 準地衡風近似の渦度方程式における発散項の意義
- 3 垂直気流及び発散の計算法について
- (I) - 断熱、非摩擦の場合 -
- 4 垂直気流及び発散の計算法について
- (II) - 非断熱、摩擦及び地形効果 -
- 5 発達の意義
- 6 加重相対発散、一地表面発散の差分近似
- 7 傾圧大気中の低気圧発達 - (I) -
低気圧の垂直軸の傾斜と発達との関係
- 8 傾圧大気中の低気圧発達 - (II) -
低気圧の生涯について
- 9 結　　語

第2部 積雲対流によって解放された潜熱の大規模現象への影響

- 1 序　　論
- 2 基礎方程式
- 3 基礎仮定
- 4 積雲対流によって解放された潜熱の平均方程式への導入
- 5 大規模スケールにおける積雲生成率
- 6 組織的対流生起の条件
- 7 準地衡風近似傾圧大気における4層数値予報モデルへの対流効果の導入
- 8 結果の議論
- 9 結　　語

論文内容要旨

第1部 地表面低気圧発達理論

1 序 論

近年、高層観測網の充実及び半球規模への拡張に伴って、特に偏西風帯の三次元的構造が著しく解明されるようになった。これに伴って、地表面高低気圧の発生、発達、衰弱と上層偏西風帯の状態との関連性が究明されるようになった。

力学的な取扱いに於ては、低気圧を不連続面における不安定波動として取扱ったノルウェー学派の代りに、三次元的な偏西風帯の不安定波動として、上層の低気圧も含めて、取扱う理論が発展した。その一つは、バロトロピック大気における不安定理論であり、もう一つは、バロクリニック大気における不安定理論である。前者には、Kuo (1949), Fjørtoft (1950), Gambo (1950) 等の理論がある。後者には、Charney (1947), Eady (1949), Berson (1949), Thompson (1953) 等の理論がある。

これらの諸理論は、低気圧形成の物理的な過程の理解には多大の貢献をした。併し乍ら、これらの理論は摂動法によって、線型化された方程式系によって議論されている。そのために、綜観的な適用という面では困難な点があった。それは、比較的簡単な基本場を観測量から定義するのが困難であり、従ってまた、擾乱場の定義も亦難しいという点であった。

低気圧の発達を綜観的に取扱うことの出来る理論が、従って必要であり、多くの研究がまたこの分野でも行われた。例えば、Bjerknes及びHolmboe (1944), Sutcliffe (1947), Petterssen (1955) 等が挙げられる。

近年、数値予報理論が発展し、実用化されるに至った。そのために、綜観気象学の分野に於ても、数値予報モデルに含まれている物理的な内容を綜観的に理解することが必要とされている。このような理論として、最もよく使用されているのは、Sutcliffeの理論である。この理論は、簡単で而も実用化されなかった移流モデルに基礎をおいている。

本論文における第一の目的は、数値予報理論を用いて、綜観的な取扱いが出来るような理論をつくりあげることである。次にこれを用いて綜観的な見地から低気圧発達を議論した。

数値予報モデルとしては、現在実用化されている多層の準地衡風、非断熱傾圧モデルが用いられている。このようなモデルから導かれた地表面発散及び上昇気流式を用いて、低気圧発達が論じられている。

2 準地衡風近似の渦度方程式における発散項の意義について

準地衡風近似の意義は、主として方程式系に、気象学的に有意義な運動のみを記述させることにある。一方、低気圧論に於ては、発散量の垂直分布が重要である。

本節に於ては、数値予報の基本式である準地衡風近似の渦度方程式における発散の意義を別な観点から取扱った。その結果、風の場合として、傾度風及びBrunt-Douglas風迄を考慮したときの発

散場が準地衡風近似の渦度方程式の発散であることを明らかにした。即ち、準地衡風近似の渦度方程式を発散の計算式に用いることは、従来考えられているより、更に程度のよい近似発散となっていることを明らかにした。

3 垂直気流及び発散の計算法 —— 断熱，非摩擦の場合

先づ，断熱の場合について，垂直気流方程式から，Fjørtoft の積分法によって垂直気流及び発散の計算式を導いた。

この式を用いて，現在実用的に予報の現業で広く使われている，Sutcliffeの地表面発散式が，低気圧の中心付近では，符号はよい近似を与えるが，4 倍～10倍も大きな評価を与えることを示した。（格子間隔は，300 軒及び600 軒とする）このことは，実際の経験によって広く確められていることであり，一般式を用いることによって，中心付近のみならず離れたところでも妥当な値を得ることが示されている。

4 垂直気流及び発散の計算法 —— 非断熱，地形，摩擦効果を含めた場合

熱の影響として，海面からの顕熱の影響を入れた場合の垂直気流及び発散式を導いた。顕熱の加熱率が高さに伴って， $(\frac{p}{p_0})^2$ という形で与えられる場合には，この項の影響による上昇気流分布は，略高さに関して，拋物線分布を示し，且つ発散分布は，下層の800 ミリバール以下が収束であり，それから上は発散であることを示した。

これらの結果は，Fukuda (1966)，Fukahara (1965) 等によって示された，日本海沿岸の豪雪時の発散分布をよく説明している。従って，日本海の豪雪時の特徴ある垂直気流分布，発散分布は，海面からの顕熱の影響によって生じていることを示した。特に日本海沿岸寄りを流れている対島暖流上では，この効果が著しく，日本海沿岸の豪雪は，海面からの顕熱の影響によって，大規模スケールで，平均的に大気下層に大きな上昇気流を生じ，これらが条件附不安定大気的不安定を解消しているために生じていることが結論されている。

更に，この影響による発散量が， 10^{-4} sec^{-1} にも達し，後に述べるように黒潮上や北太平洋のメキシコ湾流上での低気圧発生に対して重大な影響をもっていることを示した。次に，地形及び境界層内の摩擦の影響を発散式の表現に加えた。

5 加重相対発散

地表面は境界層であるために，それに適した差分近似を考えて，発散を垂直気流の微差近似式で表現した。その結果，地表面発散は，大気上層の発散と下層の発散の差として，精度よく表現されることを示した。この式を用いて，地表面発達に及ぼす上層の寄与を論ずることが出来る。この発散の表現は，加重相対発散と名付けられている。

6 傾圧大気における低気圧発達論 (I)

この節では，上述の発散式を用いて，傾圧大気中の低気圧の垂直の軸の傾きと発達の影響が論じられ，従来経験的によく知られているように，軸が後方に傾くときには発達し，前方に傾くときには衰弱することがよく説明されることを示している。

7 傾圧大気における低気圧発達論(Ⅱ)

この節では、上述の発散式を用いて、低気圧の生涯が議論されている。Petterssen の低気圧発生に関する仮説 (Petterssen 1955), 上層と地表面発散に関する統計的研究 (Petterssen 1955, Petterssen et. al 1962) が議論され、特に海面からの顕熱の影響が低気圧の発生に対して大きいことが述べられている。低気圧発達に対する下層前線帯の役割が強調され、低気圧の自己発達過程、指向則について議論されている。

第2部 積雲対流によつて解放された潜熱の大規模現象への影響

1 序 論

凝結の潜熱の放出の形態には、安定成層における層雲系統の雲の形成に伴うものと、不安定或いは条件付不安定成層に伴う積雲系統の雲に伴うものがある。低緯度、特に、熱帯低気圧に於ては、専ら積雲対流の影響によつて発生、発達することが確められている。中緯度では、これら二つが存在している。

本論文に於ては、先づ、大規模現象の数値予報に、積雲対流の影響を導入するために、積雲対流によつて放出された潜熱の平均量を、大規模現象における観測量のみで表現する理論が取扱われている。この理論の特徴とするところは、

(1) 対流雲の発生率を近似的に計算する方式を提案している。

(2) 積雲対流によつて解放された凝結の潜熱が、Bjerknes のスライス法で用いられたものと、

類似の対流モデルの下で、大規模現象の温度変化及び垂直気流の函数として表現されている。

ことであり、従つて、これらの影響は、数値予報モデルに組み入れることによって、評価することが出来る。数値予報モデルとして現用の気象庁の4層準地衡風非断熱傾圧モデルが用いられている。

テスト例として、昭和42年8月28、29日の羽越豪雨の例をとり、その場合の小低気圧の発達、集中豪雨の綜観的条件について論じられている。

2 基礎仮定

(1) 対流モデルとして、雲の発生しているところは上昇気流であり、そのまわりは下降気流場になっているというモデルを採用した。

(2) 組織的な対流運動の雲の中では、相当温位一定であり、雲の下では温位一定になっているという経験的事実をモデルとして採用する。

(3) 雲の中へ対流で運ばれた水蒸気や熱量は、水平混合によつて周囲の同じ高度の空気に十分に伝えられる。

3 積雲対流によつて解放された潜熱の平均方程式への導入

積雲対流によつて解放された凝結の潜熱を計算する式を導くために、対流雲中の平均上昇気流が先づ求められている。連続の式、超過温度(雲の内外の温度差)の式及び水平混合の仮定から、この上昇気流が、温度の時間的变化、垂直気流、雲中温度の時間的变化の函数として表現されている。

次に、基礎仮定の(2)から雲中温度の時間変化が、凝結の起っていない地表面の温度場から求められている。このようにして求められた積雲対流によって解放された凝結の潜熱の表現式を熱力学の式に代入することによって、未知函数として、温度の時間的変化、垂直気流を含んだ熱力学の式が得られる。これは、他の方程式系と組み合はせて解くことが出来る。

4 大規模スケールにおける積雲生成率

水蒸気収支の式から、積雲生成率を求める式を導いた。更に、3で求められた垂直気流式の近似式を用いることによって、時間的な変化項を省略した近似式をつくり、積雲生成率の計算式を導いた。Kuo (1965) の生成率の式との相違について論じ、Kuo の表現は著しく小さな値を与えることを示した。

5 組織的対流発生の条件

組織的対流発生の条件として

- (1) 条件付不安定成層であること。
- (2) 摩擦層内の平均場が収束場であること。
- (3) 平均場の相対湿度が、限界湿度以上であること。

が採用されている。(2)の条件と関連して、Ooyama (1968) の仮定について論じられている。また、超過温度と平均場の相対湿度との関係を用いて、対流が発達するような限界湿度を採用して、エントレインメントの影響を考慮した。

6 準地衡風近似傾圧大気における4層数値予報モデルへの対流効果の導入

気象庁の現用の4層ルーチン準地衡風、傾圧大気の数値予報モデルに、対流の影響によって解放された凝結の潜熱の影響を導入した。

7 結果の議論

昭和42年8月28、29日の日本海沿岸の羽越地方の豪雨を惹起した例に、上述の数値予報モデルを適用した。波長の短い小低気圧の発生発達と対流効果との関連性、集中豪雨の総観的条件が論じられている。

論文審査結果の要旨

偏西風帯の低気圧の発達に関する従来の研究は、物理的に簡単なモデルを想定して数理的に厳密に取扱うか、または数学的には厳密性を欠くが総観的に取扱うかの何れかの方法をとってきた。竹内衛夫の研究はこの問題に対して総観的な見地に立ちながら数値予報の手法を取り入れて、数学的に近似度を高めようとした試みである。

本論文は二部に分れる。

第一部では低気圧発達的一般論を取扱った。まず、発達に重要な発散項を考察し、準地衡風近似の渦度方程式が発散量を求めるによい近似をあたえることを示し、これに基づき、多層モデルを用い、数値予報の手法に習い、発散項を数理的に表現した。この表現は従来の Sutcliffe の表現に比し、よい近似をあたえる。次に海面より顕熱の形で熱が入った時を考え、熱の流入が多い時は 800 mb 以下で収束上層で発散があって下層に強い上昇流を生じ、洋上の低気圧発達に大きい影響を与えることを示し、さらに地形や摩擦の影響も考えた発散の表現式を得た。これらの表現を用いて傾圧大気の下気圧発達を考察し、低気圧の軸が高さと共に西に傾くときは、低気圧が発達し、逆のときは弱くなることを示した。最後に低気圧の一生に言及し、初期には下層の前面に擾乱があって、これに上層の冷たい低気圧が或いは下層からの加熱があって低気圧の発達すること、中期は下層の低気圧と上層の低気圧が対応し、低気圧の進行速度は上層の風速により定まることが、低気圧の軸が垂直になると低気圧の発達が止り、閉塞することを示した。

第二部は、積雲対流の影響の考察である。大規模な気象現象に対する積雲対流の作用を考えようとする場合、積雲対流のスケールと生長時間の違いがあることによって、そのままでは処理できない。著者は対流の平均が大規模現象に影響すると考え、観測から得られた結果から、雲の内外の気温分布、上昇速度、積雲消滅時間と周囲との混合現象等の間にもっともらしい仮定をおき、4層の準地衡風近似傾圧モデルで対流により放出された潜熱の大規模現象にあたえる影響を数式的に表現した。この結果がもっともらしい事は積雲成長率について Kuo の得た結果より実測によく合うことからうかがわれる。

以上によって竹内の論文は低気圧発達の研究に対する大きな貢献と認められる。去る 11 月 2 日審査担当者の出席のもとに竹内衛夫に論文内容を発表させ、質問に答えさせ、さらに英独 2 ヶ国語の試験を行なった。その結果を併せ竹内衛夫の提出した論文は博士学位論文として合格と認めた。